

肉类新鲜度光谱检测模型构建及误差对比分析

胡顺石 张辰璐 陈子晗 陈俞池 李心怡

(湖南师范大学 资源与环境科学学院,长沙 410081)

摘要 针对传统肉类新鲜度检测方法复杂、速度慢等问题,在试验室常温条件下采集猪肉反射率光谱数据,对肉类新鲜度的光谱检测方法进行研究,并分析不同建模方法以及不同样本采样间隔对预测精度的影响。结果表明:1)基于光谱角距离测度准则构建的加权模型,肉类新鲜度检测结果精度最高,决定系数(R^2)为0.999 7,均方根误差(RMSE)为3.427 5;2)基于欧氏距离测度准则和三次多项式拟合法所构建的模型,其 R^2 分别为0.998 1和0.998 1, RMSE分别为8.572 5和8.473 5。基于光谱角距离测度准则构建的加权内插模型,可以作为肉类新鲜度光谱快速检测模型使用,其检测精度在3种方法中最高。

关键词 肉类新鲜度; 光谱角距离; 欧氏距离; 光谱分析; 光谱检测

中图分类号 TP79 文章编号 1007-4333(2019)11-0134-07 文献标志码 A

Construction of meat freshness detection model based on spectral technology and comparative analysis on the error

HU Shunshi, ZHANG Chenlu, CHEN Zihan, CHEN Yuchi, LI Xinyi

(College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract Traditional meat freshness detection methods need longer time and complex procedure to get the results. In this study, the spectral reflectance data of pork were collected under normal temperature conditions in the laboratory, and the spectral detection methods of meat freshness were investigated. The effects of different modelling methods and sampling intervals on prediction accuracy were also analyzed. The results showed that: 1) The weighted model based on spectral angular distance criterion had the highest accuracy, whose coefficient of determination (R^2) was 0.999 7 and the root mean square error (RMSE) was 3.427 5; 2) The weighted model based on Euclidean distance criterion and cubic polynomial fitting model are next to the above method, whose R^2 were 0.998 1 and 0.998 1, and RMSE were 8.572 5 and 8.473 5, respectively. In conclusion, the weighted interpolation model based on spectral angular distance measurement could be used for rapid meat freshness detection with the highest accuracy among the above 3 methods.

Keywords meat freshness; spectral angular distance; Euclidean distance; spectral analysis; spectral detection

新鲜度是消费者购买肉类产品时所关心的重要指标。一般消费者仅根据食品标签上的“生产日期”或依靠肉眼判断肉类是否新鲜,其判定结果不具有可靠性。目前,理化检测和光谱分析技术是肉类检测中常用的高精度专业方法。近年来,光谱分析技术由于其无损、快速的检测优势,成为肉类新鲜度检测的研究热点^[1-2]。王丽等^[3]采用傅里叶变换近红

外光谱技术,以常规分析测定值为建模基础数据,采用偏最小二乘(PLS)回归法在480~935 nm处建立了反应猪肉新鲜度诸多指标的快速检测模型;刘兆丰^[4]采用多传感器信息融合技术,将近红外光谱、色差和pH三者的传感器信息通过径向基函数网络(RBFN)进行数据层的融合,对挥发性盐基氮(TVB-N)和细菌总数(TVC)进行了定量建模预测;

收稿日期:2019-03-06

基金项目:湖南省大学生研究性学习和创新性试验计划项目(201710542032);中国国家留学基金项目(201806725009)

第一作者:胡顺石,讲师,博士,主要从事遥感大数据处理技术研究,E-mail:hufrank@163.com

樊玉霞^[5]利用可见/近红外光谱分析技术等方法,对猪肉肉糜中粗脂肪、肌内脂肪、蛋白质、水分和 14 种脂肪酸进行了定量检测研究,同时对其进行了掺假检测和新鲜度检测,建立了掺假和新鲜度评价方法;刘源等^[6]以 TVB-N 作为评价指标,比较了不同预处理方法、不同建模方法以及不同波数范围所建模型精度,构建了最优冰鲜大黄鱼新鲜度定量检测模型;代琼^[7]采用连续投影算法提取虾仁的特征波段,利用高光谱成像技术实现了虾仁质构参数和色泽参数的快速无损检测及可视化分布;陶瑞等^[8]采用傅里叶变换近红外光谱仪和化学计量学方法,探究基于近红外光谱分析技术的金枪鱼新鲜度指标快速检测方法,这些研究均取得了较好的效果。

然而,由于不同食用肉类的组成成分不同,新鲜度的检测指标也有所差异,目前已有对猪肉、鹅肉、羊肉等的新鲜度基于光谱检测方法进行的研究,但还没有一种通用的方法能够快速无损检测肉类新鲜度^[9-10]。对猪肉的新鲜度检测方法研究表明,猪肉的肌红蛋白在 760 nm 处有稳定的吸收特性,可以构建单光谱特征的猪肉新鲜度检测模型,得到比较好的检测精度^[11-12];对鹅肉的新鲜度检测方法研究表明,鹅肉在 1 500、1 463、973~1 019、1 500~1 530 nm 附近出现特征吸收峰,可以用来构建鹅肉的新鲜度检测模型^[13]。对羊肉的新鲜度检测方法研究表明,基于高光谱图像的无损检测技术中,羊肉在 400~1 000 nm 有着特定可反应新鲜度的光谱信息,基于近红外光谱的无损检测技术中,羊肉在 900~2 500 nm 同样有显著的光谱信息^[14]。然而,由于不同肉类的光谱吸收特征差异大,这些基于肉类单个或多个光谱吸收特征构建的肉类新鲜度检测模型,只适用于特定肉类,其检测结果仍有一定局限性,且对光谱测量精度要求较高,如果光谱定标不准,其光谱吸收特征峰值将发生偏移,给检测结果带来误差。因此,针对光谱吸收特征构建的检测模型,只适用于特定肉类,不宜作为通用的肉类新鲜度检测模型使用。

本研究拟将肉类全谱段光谱反射率数据作为建模数据,基于光谱向量空间相似性度量准则,研究通用肉类新鲜度光谱检测模型构建方法,构建肉类新鲜度的光谱检测模型,并比较分析基于不同相似性测度构建的检测模型精度,最终确定适用于肉类新鲜度光谱快速检测的最佳方法,为肉类新鲜度光谱快速检测提供新的技术手段。

1 材料与方 法

1.1 试验样品与数据采集

试验所用样品为北京某超市采购的新鲜通脊猪肉 800 g,将样品放置于室温环境(26 ℃),每隔 5 min 采集 1 次光谱数据。试验所用光谱数据采集仪器是中国科学院遥感与数字地球研究所研制的手持式智能光谱仪 HyScan,光谱范围 350~1 050 nm,平均光谱分辨率为 5 nm。试验过程中,光谱仪和猪肉的相对位置、光源位置和光源强度,以及室内温度始终保持不变。试验所用光源为专用卤素灯,为了避免杂散光影响,试验在光学暗室中进行。试验于 10:30 开始,22:08 结束,连续测量约 12 h,共获取 134 组光谱数据,同时采集样本 pH 数据。

猪肉的平均反射率光谱随放置时间的变化见图 1。可以看出,猪肉反射率光谱随时间的变化而呈现出有一定规律的变化趋势,其中,在 400~700 和 950~1 200 nm 都有明显的光谱特征差异,在 760 nm 附近由于肌红蛋白的影响而存在显著的吸收特征,故可根据这些特征构建肉类新鲜度光谱反演模型。

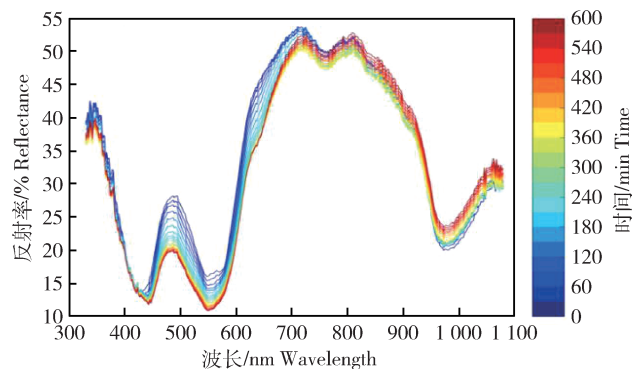


图 1 不同时间采集的猪肉平均反射率光谱数据
Fig. 1 Pork reflectance data collected at different time

1.2 模型构建方法

1.2.1 猪肉新鲜度指标

本试验用猪肉放置时间作为其新鲜度的直接衡量指标。猪肉 pH 能够反映猪肉中肌糖元酵解快慢程度,其变化与猪肉腐败变质具有较强的相关性^[15]。一般地,当肉品腐败变质时,肉品中的蛋白质分解产生氨(NH₃)和胺类(R-NH₂)等碱性含氮的有毒物质,pH 随之升高^[16]。胡云峰等^[17]研究表

明,肉糜在 5 ℃、相对湿度为 65% 的条件下存放 10 d,每隔 24 h 所测定的 pH 和挥发性盐基氮值间呈直线正相关,且挥发性盐基氮值直接反应肉类新鲜度;齐亮等^[18]研究表明,随着猪肉放置时间增长,细菌在肉表面不断地扩散繁殖,肌肉中蛋白质在细菌酶的作用下被分解为氨和胺类在含物等碱性物质,使肉趋于碱性,pH 随之增高。因此,pH 常作为肉品新鲜度的指标,衡量其是否符合食用标准。由于猪肉 pH 随时间的变化敏感性不高,本试验中每 30 min 测量 1 次,而猪肉的光谱反射率对猪肉随时间的变化更敏感,故每 5 min 测量 1 次。试验结果见图 2。可知,随着猪肉放置时间的增加,其 pH 成线性升高趋势,表明新鲜度逐渐降低,故可用猪肉放置时间作为其新鲜度的直接衡量指标。

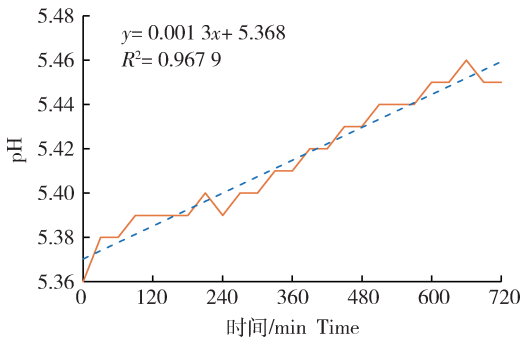


图 2 猪肉样本 pH 随放置时间的变化

Fig. 2 Relationship between pork pH and time

1.2.2 光谱角距离测度

光谱角(Spectral angle, SA)是指 2 个光谱向量在光谱空间上所形成的夹角,光谱角距离(Spectral angle distance, SAD)测度是指在光谱向量空间中计算 2 个光谱向量之间的夹角,将其作为 2 条光谱相似性判断的依据。试验获取的肉类反射光谱在向量空间的表达为:

$$\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_N] \quad (1)$$

式中: r_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 为肉类在第 i 波段的光谱反射率; N 为光谱向量空间维度,即波段数量。2 个向量之间的光谱角为^[19]:

$$\cos\alpha = \frac{\mathbf{t} \cdot \mathbf{r}}{\|\mathbf{t}\| \times \|\mathbf{r}\|} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N t_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N r_i^2}} \quad (2)$$

式中: \mathbf{t} 为待检测光谱向量; α 表示欧几里得范数; α 为 2 条光谱向量之间的夹角,即光谱角, α 取值越

小,表示待检测光谱向量与参考光谱向量的相似性越高,反之,表示二者相似性越低。

1.2.3 欧氏距离测度

2 个光谱向量 \mathbf{t} 和 \mathbf{r} 之间的欧氏距离 D (Euclidean distance) 表示如下:

$$D = \|\mathbf{t} - \mathbf{r}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^N (t_i - r_i)^2} \quad (3)$$

1.2.4 模型构建

式(2)和式(3)是计算待检测样本与已知样本相似性的 2 种测度方法,利用这 2 个公式可以计算得到待测样本与已知样本之间的相似性测度值;根据其值大小,得到光谱角距离(欧氏距离)相似性测度最优值(最小值)和次最优值(次最小值);然后再求权重,获得加权的猪肉放置时间预测值 F , 以此表示猪肉新鲜度。公式如下:

$$F = W_a \cdot V_a + W_b \cdot V_b \quad (4)$$

式中: V_a 、 V_b 分别表示待检测光谱向量与猪肉新鲜度先验光谱库中参考向量最小和次最小度量值对应的猪肉放置时间; W_a 表示 V_b 对应的光谱向量权重, $W_a = \frac{D_b}{D_a + D_b}$; W_b 表示 V_a 对应的光谱向量权重, $W_b = \frac{D_a}{D_a + D_b}$; D_a 、 D_b 分别表示采用光谱角距离(欧氏距离)测度准则得到的最优和次最优度量值。

肉类新鲜度模型构建,可直接利用以上相似性测度准则,基于已知样本库和数学统计分析的经验模型,通过线性或非线性模型回归分析构建新鲜度预测模型;另外,也可以基于深度学习,神经网络等构建^[20]。

1.3 数据处理

为了减少测量偶然误差和提高数据精度,对每组采集的 10 条光谱数据求平均,将该平均反射率光谱值作为该组的光谱数据;将试验过程中采集的 134 组光谱数据随机均分成两部分:一部分作为猪肉新鲜度已知先验知识库,进行训练,得到模型参数;另一部分作为验证数据,用于模型精度验证;将猪肉新鲜度先验光谱库中的光谱向量作为参考光谱向量,将测试样本集中的光谱向量作为待检测光谱向量,利用式(2)或(3),计算所有待检测光谱向量与先验光谱库中的每条参考光谱向量的光谱角距离(欧氏距离),利用模型(4)计算猪肉预测放置时间,然后与实际的放置时间进行比较并建立线性拟合方

程,根据方程的 R^2 和 RMSE 分析不同建模方法精度的差异。

另外,为了探索猪肉光谱不同采集时间间隔对模型预测精度的影响,将猪肉新鲜度先验光谱库中的光谱数据按 10、15、20、25、30 min 采集间隔分成 5 组数据,根据所建立的模型分别计算不同组数据得到的猪肉放置时间,从而分析采样间隔对模型精度构建的影响。

2 结果与分析

2.1 基于非线性回归分析的检测结果

为比较不同的建模方法精度的差异,本研究首先使用传统的经验统计方法构建模型。利用式(2)计算训练样本集每条光谱与初始新鲜度光谱(0 min)的光谱角距离,以所得光谱角距离为自变量,以预测放置时间为因变量,进行 3 次多项式拟合(图 3),模型 $R^2=0.9983$,公式如下:

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (5)$$

式中: $a=2.0 \times 10^{-5}$, $b=-0.0431$, $c=0.0347$, $d=20.349$ 。

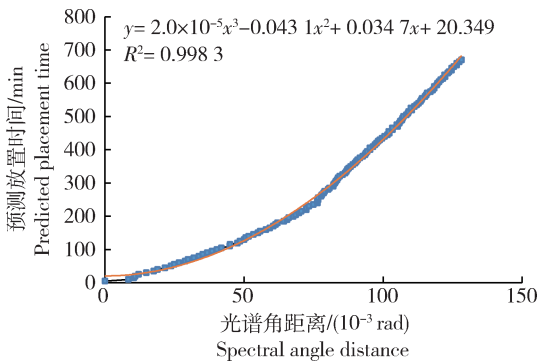


图 3 预测放置时间随光谱角距离变化的关系

Fig. 3 Relationship between the predicted placement time and the spectral angle distance

利用模型(5)作为肉类新鲜度的检测模型,可计算得到预测放置时间,并以放置时间作为猪肉新鲜度的衡量指标,而后用验证数据进行验证得到模型的检测精度。图 4 为基于非线性回归模型(式(5))得到的预测放置时间与实际放置时间的相关性分析结果,决定系数 R^2 为 0.9982,均方根误差 RMSE 为 8.7535。该多项式拟合模型需要在已知样本的基础上进行统计分析,从而得到拟合方程系数,是一种经验模型方法,模型普适性差。

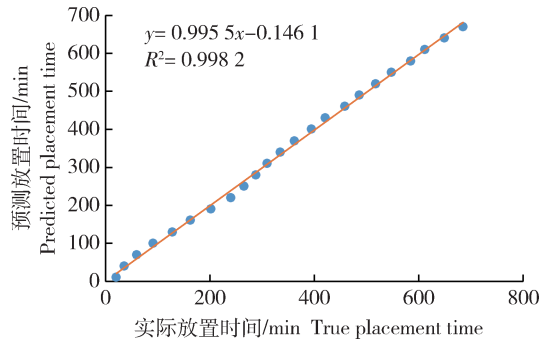


图 4 基于光谱角三次多项式回归分析的猪肉放置时间预测值与真实值的相关性

Fig. 4 Correlation between the predicted and the true placement time based on cubic fitting

2.2 基于光谱相似度匹配法的检测结果

2.2.1 光谱角距离测度法

基于光谱角距离测度的建模方法中,首先利用式(2)计算待测样本光谱向量与所有训练样本的光谱角,确定最小光谱角数值 D_a 和次最小光谱角数值 D_b ,然后利用式(4)计算待测样本新鲜度检测结果。图 5 为基于光谱角距离测度法得到的检测结果,图中,横坐标为猪肉放置时间真实值,纵轴为猪肉放置时间预测值,构建线性拟合模型。模型的 R^2 为 0.9998,均方根误差 RMSE 为 3.4275,具有较高的精度。因此,利用光谱角距离作为构建猪肉新鲜度检测模型的测度可以达到较好的精度。

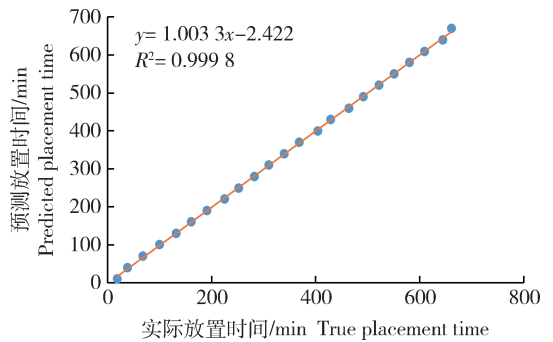


图 5 基于光谱角测度的猪肉放置时间预测值与实测值的相关性

Fig. 5 Correlation between the predicted and the true placement time based on spectral angle measurement

2.2.2 欧氏距离测度法

基于欧氏距离测度的猪肉新鲜度检测方法,首先利用式(2)计算待测样本光谱向量与所有训练样本的欧氏距离,然后寻找最小欧氏距离值 D_a 和次最

小欧氏距离值 D_b ，利用式(5)计算待测样本的预测放置时间。图6为基于欧氏距离测度法得到的检测结果，可以看出，预测值与真实值相关系数很高， R^2 达到0.9983，RMSE为8.5725，略低于光谱角距离测度的检测结果。因此，利用欧氏距离作为相似性度量构建猪肉新鲜度检测模型，能得到略次于光谱角距离测度的较好检测精度。

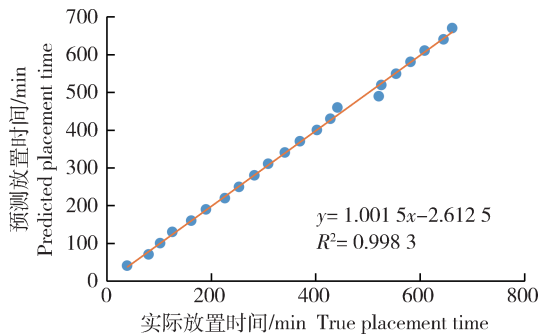


图6 基于欧氏距离测度的猪肉新鲜度预测值与实测值相关性

Fig. 6 Correlation between the predicted and the true placement time based on euclidean distance measurement

2.3 采样间隔对模型预测结果的影响

为了分析样本采样间隔对预测结果的影响，试验基于不同的采样间隔，分别为10、15、20、25、30 min，对比了采用光谱角距离、欧氏距离、三次多

项式拟合方法构建模型采样间隔对结果的影响(图7)。随着采样间隔的增大，基于光谱角距离构建的模型精度越来越低，而欧氏距离构建的模型精度波动，规律不是很明显，但基于多项式拟合法构建的模型，随着采样间隔的增大，其精度变化不大，这是因为多项式拟合方法是基于已知样本，拟合得到3次多项式作为经验模型，而光谱角和欧氏距离的相似度匹配模型，采样间隔的增大，将增加模型内插求预测值的误差。

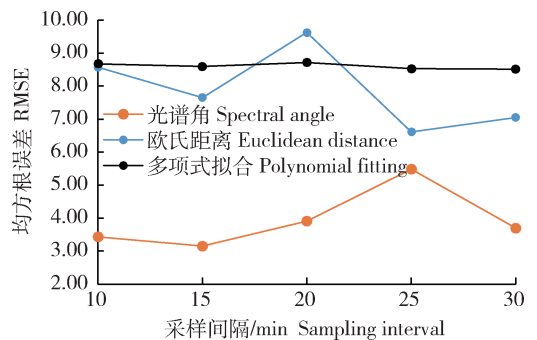


图7 不同采样间隔对不同模型精度的影响

Fig. 7 The influence of different sampling intervals on different models

表1示出不同建模方法在不同采样间隔下的 R^2 及RMSE结果，可见这3种方法中，基于光谱角距离测度方法得到的检测结果精度最高。

表1 不同建模方法的误差比较结果

Table 1 Results of comparison using different method

采样间隔/ min Sampling interval	光谱角距离 Spectral angle distance		欧氏距离 Euclidean distance		三次拟合法 Cubic fitting	
	均方根误差 RMSE	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE	决定系数 R^2
10	3.427 5	0.999 7	8.572 5	0.998 1	8.743 5	0.998 1
15	3.151 6	0.999 7	7.652 8	0.998 5	8.646 7	0.998 1
20	3.903 1	0.999 6	9.625 3	0.997 7	8.733 7	0.998 1
25	5.481 1	0.999 2	6.615 8	0.998 9	8.546 8	0.998 2
30	3.694 4	0.999 7	7.050 2	0.998 7	8.532 4	0.998 2

3 结 论

为克服传统肉类新鲜度检测方法的不足，本研究分别基于光谱角距离、欧氏距离2种光谱测度开

展了肉类新鲜度全光谱匹配建模方法的研究，并与经验统计建模方法构建的3次多项式拟合方法进行了比较。此外，本研究比较了不同光谱采样间隔对肉类新鲜度检测精度的影响。主要结论如下：

1)与基于特定波段吸收特征的肉类新鲜度检测模型相比,本研究提出的全波段光谱匹配加权内插方法,能够实现高精度肉类新鲜度的快速检测,由于模型的构建不依赖于特定肉类的吸收光谱特征,因此本研究方法可应用于不同种类的肉类新鲜度检测。

2)采样间隔对基于光谱角、欧氏距离测度的光谱匹配算法的建模精度有影响,因此研究人员应合理选取最优采样间隔,构建肉类新鲜度先验光谱库。而对于基于统计方法所构建的检测模型,采样间隔的变化对其检测结果影响不大。

本研究可为肉类新鲜度的快速无损光谱检测提供重要的理论和方法支撑,后续研究将聚焦在利用深度学习神经网络模型在肉类新鲜度的光谱快速检测模型设计与开发。

致谢

感谢中国科学院遥感与数字地球研究所高光谱研究室为本研究提供了试验场地及光谱仪器。

参考文献 References

[1] 汪希伟. 基于光谱成像的猪肉新鲜度检测方法[D]. 南京:南京林业大学,2014
Wang X W. New approach to detect freshness of pork using spectral imaging [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014 (in Chinese)

[2] 张忠. 肉类新鲜度的近红外光谱检测方法研究[D]. 宜昌:三峡大学,2017
Zhang Z. Study on detection methods of freshness for meat based on near infrared spectrum technology [D]. Yichang: Sanxia University, 2017 (in Chinese)

[3] 王丽,刘兆丰,励建荣. 近红外光谱技术快速检测猪肉新鲜度指标的方法研究[J]. 中国食品学报,2012,12(6):159-165
Wang L, Liu Z F, Li J R. Rapid determination of pork freshness attributes by near infrared spectroscopy[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2012, 12(6):159-165 (in Chinese)

[4] 刘兆丰. 基于近红外光谱技术的猪肉新鲜度快速预测与识别[D]. 杭州:浙江工商大学,2012
Liu Z F. Detection and identification of pork freshness based on near infrared spectroscopy[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2012 (in Chinese)

[5] 樊玉霞. 猪肉肉糜品质与安全可见/近红外光谱快速检测方法

的实验研究[D]. 杭州:浙江大学,2011
Fan Y X. Rapid detection of minced pork quality and safety based on visible and near infrared spectroscopy[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011 (in Chinese)

[6] 刘源,陈伟华,侯巧娟,王锡昌,董若琰,吴浩. 应用近红外光谱技术评价冰鲜大黄鱼新鲜度的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014,34(4):937-941
Liu Y, Chen W H, Hou Q J, Wang X C, Dong R Y, Wu H. Study on freshness evaluation of ice-stored large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) using near infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(4):937-941 (in Chinese)

[7] 代琼. 基于高光谱成像技术的虾仁新鲜度检测研究[D]. 广州:华南理工大学,2015
Dai Q. Potential of hyperspectral imaging for evaluating prawns freshness[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015 (in Chinese)

[8] 陶瑞,史智佳,贡慧,杨震,刘梦,王辉. 傅里叶变换近红外光谱技术快速检测金枪鱼新鲜度[J]. 肉类研究,2017,31(4):43-49
Tao R, Shi Z J, Gong H, Yang Z, Liu M, Wang H. Rapid determination of tuna meat freshness based on Fourier transform near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Meat Research*, 2017, 31(4):43-49 (in Chinese)

[9] 王魏,何鸿举,王慧,马汉军,陈复生,刘玺,刘苏汉,刘宏,康壮丽,潘润淑,朱明明,赵圣明,王正荣. 基于近红外技术的生鲜猪肉质量检测最新研究进展[EB/OL]. 2018-12-24. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20181220.1331.011.html>
Wang W, He H J, Wang H, Ma H J, Chen F S, Liu X, Liu S H, Liu H, Kang Z L, Pan R S, Zhu M M, Zhao S M, Wang Z R. Recent progress on near-infrared technology for fresh pork quality assessment [EB/OL]. 2018-12-24. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20181220.1331.011.html> (in Chinese)

[10] 朱启兵,肖盼,黄敏,尹克. 基于特征融合的猪肉新鲜度高光谱图像检测[J]. 食品与生物技术学报,2015,34(3):246-252
Zhu Q B, Xiao P, Huang M, Yin K. Feature fusion for detection of pork freshness based on hyperspectral imaging technology [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2015, 34(3):246-252 (in Chinese)

[11] 黄长平,朱欣然,张辰璐,乔娜,胡顺石,张立福. 猪肉新鲜度光谱特征指数构建及敏感性分析[J]. 光谱学与光谱分析,2018,38(2):552-558
Hang C P, Zhu X R, Zhang C L, Qiao N, Hu S S, Zhang L F. Pork freshness spectral feature index: development and sensitivity analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*,

- 2018,38(2):552-558 (in Chinese)
- [12] 张学文,张立福,黄长平,郑兰芬,童庆禧. 基于 FISS 成像光谱数据的鲜、解冻肉识别研究[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(8):2187-2190
Zhang X W, Zhang L F, Huang C P, Zheng L F, Tong Q X. Fresh and frozen-thawed meat discrimination based on FISS imaging spectral data[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011,31(8):2187-2190 (in Chinese)
- [13] 杨勇,王殿友,杨庆余,林巍,李毛毛,王存堂,张舵,董原,裴世春. 近红外光谱技术快速测定鹅肉新鲜度[J]. 食品科学,2014,35(24):239-242
Yang Y, Wang D Y, Yang Q Y, Lin W, Li M M, Wang C T, Zhang D, Dong Y, Pei S C. Rapid determination of goose meat freshness using near infrared spectroscopy[J]. *Food Science*, 2014,35(24):239-242 (in Chinese)
- [14] 邱园园. 基于高光谱和近红外信息融合的羊肉新鲜度无损检测研究[D]. 石河子:石河子大学,2018
Qiu Y Y. Study on nondestructive detection of mutton freshness based on information fusion using hyperspectral image and near-infrared spectroscopy [D]. Shihezi: Shihezi University, 2018 (in Chinese)
- [15] 张良培,张立福. 高光谱遥感[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005:35-36
Zhang L P, Zhang L F. *Hyperspectral Remote Sensing* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005:35-36 (in Chinese)
- [16] 张雷蕾,李永玉,彭彦昆,王伟,江发潮,陶斐斐,单佳佳. 基于高光谱成像技术的猪肉新鲜度评价[J]. 农业工程学报,2012,28(7):254-259
Zhang L L, Li Y Y, Peng Y K, Wang W, Jiang F C, Tao F F, Shan J J. Determination of pork freshness attributes by hyperspectral imaging technique [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(7): 254-259 (in Chinese)
- [17] 胡云峰,王雅迪,唐裕轩. 猪肉糜在贮藏过程中的变化规律及新鲜度快速测定方法的研究[J]. 食品研究与开发,2018,39(15):178-181
Hu Y F, Wang Y D, Tang Y X. Research on the change law of pork chyle during storage and the method for rapid determination of freshness[J]. *Food Research and Development*, 2018,39(15):176-181 (in Chinese)
- [18] 齐亮,宋莹莹. 猪肉新鲜度评价指标的实测与比较[J]. 轻工科技,2017,33(10):7-9
Qi L, Song Y Y. Actual measurement and comparison of pork freshness evaluation indicators[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2017,33(10):7-9 (in Chinese)
- [19] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. Theory[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1981,86(B4): 3039-3054
- [20] 李刚,曲世海,郭培源. 基于神经网络的肉类新鲜度辨识技术[J]. 北京工商大学学报:自然科学版,2005(2):36-39
Li G, Qu S H, Guo P Y. Identification technology of meat fresh degree based on datum merging through neural network[J]. *Journal of Beijing Technology and Business University: Natural Science Edition*, 2005(2):36-39 (in Chinese)

责任编辑:刘迎春